

ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ  
Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Научно-исследовательский технологический институт им. А. П. Александрова»

# ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

№ 2 (12) 2018 г.

Сосновый Бор  
2018

---

---

# ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Периодический рецензируемый научно-технический сборник  
№ 2 (12) 2018

Издается с 2015 года

Сборник распространяется на территории Российской Федерации

---

---

## Редакционная коллегия

Главный редактор — **В. А. Василенко**, доктор технических наук, генеральный директор  
ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».  
Заместитель главного редактора — **Р. Д. Филин**, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».

## Члены редакционной коллегии

**В. Р. Аксенов**, (ответственный редактор), кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».  
**В. И. Альмяшев**, кандидат химических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».  
**А. Я. Благовещенский**, доктор технических наук, профессор ВУНЦ-ВМФ «Военно-морская академия», Военно-морской политехнический институт, Санкт-Петербург.  
**В. И. Бурсук**, кандидат технических наук, заместитель Главнокомандующего ВМФ по вооружению — начальник кораблестроения и вооружения.  
**В. С. Гурский**, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».  
**А. В. Ельшин**, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».  
**А. А. Ефимов**, кандидат химических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».  
**В. Н. Зимаков**, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».  
**Ю. В. Крюков**, (ответственный секретарь), кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».  
**Ю. А. Мигров**, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».  
**Л. Н. Москвин**, доктор химических наук, Санкт-петербургский государственный университет.  
**Е. Б. Панкина**, кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».  
**С. А. Петров**, доктор технических наук, НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ, Санкт-Петербург.  
**О. Ю. Пыхтеев**, кандидат химических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».  
**О. Б. Самойлов**, доктор технических наук, АО «ОКБМ Африкантов».  
**В. Б. Хабенский**, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».

**Учредитель:** ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский технологический институт им. А. П. Александрова».

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций  
**Свидетельство о регистрации СМИ:** ПИ № ФС77-58865 от 28.07.14 г.

Адрес редакции: 188540 Россия, Ленинградская область, г. Сосновый Бор, Копорское шоссе 72,  
ФЯО ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».

Телефоны: 8 (813-69) 2-39-64 — заместитель гл. редактора. 8 (813-69) 6-01-43 — отв. секретарь редколлегии.  
Факс: 8 (813-69) 2-36-72. E-mail: foton@niti.ru; Интернет сайт: www.niti.ru

**Подписной индекс 43300 в объединенном каталоге «Пресса России».**

При перепечатке ссылка на периодический рецензируемый научно-технический сборник «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» обязательна.

© ФЯО ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», 2018

# Содержание

## Выпуск № 2 (12) 2018

Предисловие . . . . .	7
<i>Моделирование и исследование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов объектов с ЯЭУ</i>	
В. Г. Артемов, Л. М. Артемова, В. Г. Коротаев, П. А. Михеев Применение метода анализа неопределенностей и чувствительности для исследования устойчивости ядерного реактора . . . . .	9
<i>Химические технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, радиохимические и материаловедческие исследования</i>	
В. Г. Крицкий, И. Г. Березина, П. С. Стяжкин, Н. А. Прохоров Зависимость равномерной коррозии конструкционных материалов в водных контурах АЭС от термодинамических факторов равновесия. Часть 2. Сплавы на основе циркония, алюминия и меди . . . . .	21
Т. В. Воронина, Д. Ю. Тугушева, С. С. Толстоухов On-line контроль содержания трития в водных теплоносителях реактора ПИК на базе проточного радиометра WILMA . . . . .	32
<i>Исследование процессов при тяжелых авариях на объектах атомной энергетики</i>	
В. Б. Хабенский, В. С. Грановский, В. И. Альмяшев, С. А. Витоль, Е. В. Крушинов, С. Ю. Котова, А. А. Сулацкий, Ю. А. Мигров, В. В. Гусаров, С. В. Бешта Влияние термоградиентных условий на физико-химическое взаимодействие расплава субоxygenного кориума и корпусной стали при удержании расплава в корпусе реактора . . . . .	42
А. А. Фиськов, В. Г. Крицкий, А. Ю. Макаеев, Ю. Н. Макаеев, В. М. Погребенков Исследование поведения покрытия контейнента на основе органосиликатной композиции ОС 51–03 при тяжелых авариях на АЭС . . . . .	66
<i>Информация для авторов</i>	
Требования к оформлению и содержанию статей, публикуемых в научно-техническом сборнике «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» . . . . .	75
Правила подачи материалов в редакцию . . . . .	79

УДК 621.039.51

## **Применение метода анализа неопределенностей и чувствительности для исследования устойчивости ядерного реактора**

*В. Г. Артемов, Л. М. Артемова, В. Г. Коротаев, П. А. Михеев*

ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

### **Аннотация**

Изложена технология расчетных исследований гидродинамической неустойчивости ядерного реактора с использованием метода анализа неопределенности и чувствительности и сопряженной нейтронно-физической и теплогидравлической модели активной зоны.

Технология отработана на примере экспериментального режима, зарегистрированного при стендовых испытаниях транспортной реакторной установки на одном из стендов-прототипов ЯЭУ Научно-исследовательского технологического института им. А. П. Александрова.

Ключевые слова: ядерный реактор, гидродинамическая неустойчивость, анализ неопределенности, расчёт, эксперимент.

УДК 621.039.534.44

## **Зависимость равномерной коррозии конструкционных материалов в водных контурах АЭС от термодинамических факторов равновесия.**

### **Часть 2. Сплавы на основе циркония, алюминия и меди**

*В. Г. Крицкий, И. Г. Березина, П. С. Стяжкин, Н. А. Прохоров*

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт энергетических технологий «АТОМПРОЕКТ» (АО «АТОМПРОЕКТ»), г. Санкт-Петербург, Россия

#### **Аннотация**

Представлен методологический подход к прогнозированию коррозии в водных контурах АЭС конструкционных материалов на основе циркония, алюминия и меди. Физико-химическая основа метода – зависимость скорости процесса окисления от рассчитанной термодинамической равновесной валовой концентрации продуктов коррозии в теплоносителе. Установлено, что процесс контролируется кинетикой диффузии воды через образующуюся на поверхности металла пленку оксида (гидроксида).

**Ключевые слова:** АЭС, водный теплоноситель, конструкционные материалы, коррозия, термодинамическое равновесие, кинетика окисления.

УДК621. 039.534

## **On-line контроль содержания трития в водных теплоносителях реактора ПИК на базе проточного радиометра WILMA**

*Т. В. Воронина\*, Д. Ю. Тугушева\*, С. С. Толстоухов\*\**

\* НИЦ «Курчатовский институт» -ПИЯФ, г. Гатчина Ленинградской области, Россия

\*\*ЗАО «ПРИБОРЫ», г. Москва, Россия

### **Аннотация**

На реакторе ПИК (НИЦ КИ—ПИЯФ) по проекту предусмотрен непрерывный дистанционный мониторинг теплоносителя контура тяжеловодного отражателя (ТВО). Для этого разработана автоматическая система пробоотбора и анализа тяжелой воды (АСПА ТВ). В ее состав для контроля содержания трития включен проточный радиометр. Предложено использовать в составе АСПА ТВ радиометр Wilma производства LabLogic и кювету с твердым сцинтиллятором.

В работе представлены первые результаты испытаний проточного радиометра Wilma. Установлены основные метрологические характеристики прибора в реальных условиях эксплуатации. По контрольным образцам тяжелой воды выполнены сличительные измерения. Проведена градуировка прибора. Установлено, что эффективность регистрации  $^3\text{H}$  для Wilma и кюветы с твердым сцинтиллятором составляет не менее 9%. Полученные результаты позволяют использовать Wilma как подсистему автоматизированного контроля нижнего уровня АСПА ТВ.

**Ключевые слова:** тритий, проточный радиометр, АСПА ТВ, реактор ПИК.

## Влияние термоградиентных условий на физико-химическое взаимодействие расплава субокисленного кориума и корпусной стали при удержании расплава в корпусе реактора

*В. Б. Хабенский<sup>1</sup>, В. С. Грановский<sup>1</sup>, В. И. Альмяшев<sup>1,2</sup>, С. А. Витоль<sup>1</sup>, Е. В. Крушинов<sup>1</sup>, С. Ю. Котова<sup>1</sup>, А. А. Сулацкий<sup>1</sup>, Ю. А. Мигров<sup>1</sup>, В. В. Гусаров<sup>2,3</sup>, С. В. Бешта<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия;

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В. И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ»», Санкт-Петербург, Россия;

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, РАН, Санкт-Петербург, Россия;

<sup>4</sup> Королевский технологический институт (КТН), Стокгольм, Швеция.

### Аннотация

При удержании расплава в корпусе реактора формирование ванны на днище корпуса происходит в процессе взаимодействия расплава субокисленного кориума и стали внутрикорпусных конструкций. Образующаяся ванна расплава состоит из расслоенных оксидной и металлической жидких фаз. В общем случае, сосуществующие оксидная и металлическая жидкости имеют различную температуру, но между ними устанавливается химическое равновесие.

В программе ОЭСР MASCA были получены данные по составу двухжидкостной ванны расплава прототипного кориума и стали в условиях, близких к термодинамически равновесным. В экспериментах проекта МНТЦ METCOR оксидная и металлическая части двухжидкостной системы находились при различных температурах. При этом металлическая часть формировалась в результате взаимодействия расплава субокисленного кориума с охлаждаемой корпусной сталью ВВЭР, а именно, в результате растворения (коррозии) стали и перераспределения компонентов между образующимся металлическим расплавом и расплавом субокисленного кориума до достижения предельной температуры (предельной глубины) коррозии.

На основе модельных представлений о механизме коррозии в рассматриваемых условиях систематизированы данные по предельной температуре растворения (коррозии) корпусной стали ВВЭР. Показано существенное влияние термоградиентных условий. Учет описанных эффектов необходим при анализе как коррозии корпусной стали, так и состава и структуры ванны расплава.

**Ключевые слова:** кориум, тяжелые аварии, внутрикорпусное удержание, термоградиентные условия, двухжидкостная оксидно-металлическая ванна расплава, индукционная плавка в холодном тигле.

## **Исследование поведения покрытия контейнмента на основе органосиликатной композиции ОС 51–03 при тяжелых авариях на АЭС**

*<sup>1</sup> А. А. Фиськов, <sup>1</sup> В. Г. Крицкий, <sup>2</sup> А. Ю. Макасеев, <sup>2</sup> Ю. Н. Макасеев, <sup>3</sup> В. М. Погребенков*

<sup>1</sup> АО «АТОМПРОЕКТ», г. Санкт-Петербург, Россия.

<sup>2</sup> Северский технологический институт НИЯУ МИФИ, г. Северск, Россия.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия.

### **Аннотация**

Проведены исследования термической стойкости покрытия ОС-51–03 в условиях протекания тяжелых аварий при температуре до 250 °С и продолжительности 24 часа, а также исследованы характеристики образующегося поставарийного дебриса. Определены стойкость наносимого покрытия, размеры, плотность и удельный вес частиц поставарийного дебриса, вязкость и плотность полученных модельных растворов, а также время их осветления. Полученные материалы используются для обоснования безопасности применения покрытия на основе органосиликатной композиции ОС-51–03 при проектировании АЭС.

**Ключевые слова:** органосиликатная композиция, тяжелая авария, коррозионная защита, дебрис, контейнмент, АЭС, ВВЭР, безопасность.